

学校编码: 10384

学号: 25320121151714

分类号____密级____

UDC____

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

北武夷山隧道围岩室内声发射特性研究

Study on Acoustic Emission Characteristics of Tunnel
Wall Rock of North Wuyi Mountain in Laboratory

林朝阳

指导教师姓名: 黄玉仁教授 李庶林教授

专 业 名 称: 岩土工程

论文提交日期: 2015 年 5 月

论文答辩时间: 2015 年 6 月

学位授予日期:

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2015 年 5 月

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为()课题(组)的研究成果,获得()课题(组)经费或试验室的资助,在()试验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或试验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

（ ） 1.经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，于
年 月 日解密，解密后适用上述授权。

（ ☒ ） 2.不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

摘要

作为一种无损检测技术,声发射与微震监测技术常被用作研究脆性材料在荷载作用下失稳破坏的工具,它是利用声波或地震原理来探测岩爆发生前岩体破裂的前兆特性,进而对可能要发生的岩爆进行评估和预警。北武夷山隧道福建段有长约 1150m 施工段埋深在 644.3~1100m 之间,属于极高应力区。在这样的大埋深、高地应力条件下进行隧洞开挖,极易在开挖过程中引起岩爆,因此在施工掘进过程中,采用声发射与微震监测技术对隧洞围岩体稳定性进行连续、实时监测。为更好地开展施工现场的声发射微震监测预警工作,本文针对具有典型代表性的凝灰岩和花岗岩进行室内声发射特性研究,根据其加载破坏过程中的声发射特性,为现场监测预警工作提供参考依据。

根据所选取的北武夷山隧道岩样,在室内开展单轴压缩试验,获得简单加载和循环加卸载条件下岩石试样撞击、能量及定位事件空间分布等声发射参数,并对这些参数特性进行研究。研究表明,岩石试样失稳破坏前期,撞击数、能量和事件数具有突增特性,但突增对应的应力百分比不同,通过将三者结合起来,可为工程现场围岩体稳定性监测的危险预判提供参考依据。从能量释放的角度,对岩石加载条件下发生 Felicity 效应的前后阶段能量释放特性进行分析,对 Felicity 现象进行深入研究,发现发生 Felicity 效应的前一次加载时有大量的能量释放,表明 Felicity 效应是由于岩石内部发生较大损伤破坏而导致岩性改变的外在反映。对试验过程中所获得的声发射参数时间序列,按照应力百分比及加卸载循环进行分段,研究不同应力阶段声发射参数分形特性,结果表明在简单加载条件下,花岗岩能量系列破坏时分形维数值为 0.04,凝灰岩为 0.02;花岗岩撞击系列破坏时分形维数值为 0.2,凝灰岩为 0.1。在循环加载条件下,花岗岩和凝灰岩撞击系列破坏前分形维值均为 0.1,能量序列均为 0.02。根据定位事件演化发展,研究岩石试样加载破坏过程中内部裂纹及损伤发展的演化规律,运用盒维法,对不同阶段定位事件的空间分形维数进行计算,得到岩石破坏前的空间分形维数值最低,其值约为 2.6。

关键词: 岩石声发射; 循环加载; 空间分形维; 柱覆盖法

Abstract

As a kind of nondestructive testing technology, Acoustic Emission and Micro-seismic monitoring is a good tool to study the failure course of fragile material. They use acoustic wave or earthquake theory to detect the precursory characteristics of rock cracking before rock-burst, then evaluate and warn the potential rock-burst. Fujian section of North Wuyi Mountain tunnel has a total length of 1150m and depth of 664m~1100m, which belong to high crustal stress. Tunnel surrounding rock is monitored continuously by Acoustic Emission and Micro-seismic monitoring technology during construction. Study of Acoustic Emission characteristics of typical rock of the tunnel, granite and tuff, are carried out in laboratory in order to serve the pre-warning of dangerous in construction site. Acoustic Emission characteristics of the failure progress are used as reference frame in construction site.

The typical rock specimen of north Wuyi tunnel, granite and tuff are tested under uniaxial loading in laboratory. Acoustic Emission parameters such as hits, energy, events, spatial distribution of events et al. are obtained under simple loading and incremental loading-unloading. The studies showed that hits, energy and events will increase suddenly at different percentage of stresses before rock specimen failure, such character above can be used together as reference frame of construction site rock-burst warning. Felicity effect was further study by compare its energy characteristic before and after when the Felicity effect occur. It shows that the energy will release largely at previous loading cycle when the felicity effect occur, this suggest that Felicity effect is caused by change of rock property for the reason of large inner damage. Time series of Acoustic Emission obtained by laboratory test are divided into section by the percentage of stress or loading cycle, then the fractal features and its change rule are study according to the time series of Acoustic Emission parameter. The result shows that under simple loading, the energy series fractal dimension of granite before failure is 0.04 while tuff is 0.02, hits series fractal dimension of granite and tuff are 0.2 and 0.1 accordingly. Under cycle loading, energy series are both 0.02 before failure while hit series are both 0.1. Evolution method of

fracture and damage inside the rock specimen under the uniaxial loading are studied according to the change of the events of spatial distribution. Spatial fractal features of different stage are calculated by means of box-cover method. It shows that the spatial fractal dimension reach the minimum at rock failure point, the value of it is about 2.6.

Key word: rock acoustic emission; cycle loading; spatial fractal dimension; Column cover method

目录

| | |
|--------------------------------|-----------|
| 第一章 绪论 | 1 |
| 1.1 问题的提出及研究意义..... | 1 |
| 1.2 岩石声发射研究进展..... | 3 |
| 1.2.1 声发射参数变化研究进展..... | 3 |
| 1.2.2 声发射分形研究进展..... | 6 |
| 1.3 研究内容与方法..... | 8 |
| 第二章 声发射试验原理及方法 | 10 |
| 2.1 声发射产生的条件 | 10 |
| 2.2 声发射传播特性 | 11 |
| 2.2.1 固体中的弹性波..... | 11 |
| 2.2.2 波在弹性介质中的衰减..... | 12 |
| 2.2.3 声发射波在实体中的传播..... | 12 |
| 2.3 声发射信号分析 | 12 |
| 2.3.1 声发射信号类型..... | 12 |
| 2.3.2 信号波形特征参数..... | 12 |
| 2.4 定位算法介绍 | 16 |
| 2.5 室内试验..... | 19 |
| 2.5.1 岩石试样制备..... | 19 |
| 2.5.2 试验原理..... | 22 |
| 2.5.3 试验仪器..... | 21 |
| 2.5.4 声发射仪器操作..... | 23 |
| 2.5.5 试验加载方式..... | 27 |
| 第三章 单轴加载岩样声发射参数特性 | 29 |
| 3.1 简单加载声发射特性 | 29 |
| 3.1.1 撞击数变化特性..... | 30 |
| 3.1.2 事件数变化特性..... | 32 |
| 3.1.3 能量变化特性..... | 35 |
| 3.1.4 分析与讨论..... | 36 |
| 3.2 增量加卸载声发射特性..... | 40 |
| 3.2.1 撞击数变化特性..... | 41 |
| 3.2.2 能量变化特性..... | 45 |

| | |
|------------------------------------|-----------|
| 3.3 Kaiser 效应与 Felicity 效应 | 47 |
| 3.4 本章小结 | 48 |
| 第四章 岩石加载破坏过程中分形特征研究 | 50 |
| 4.1 撞击及能量时序分形特性 | 50 |
| 4.1.1 分形维数计算 | 50 |
| 4.1.2 能量及撞击时序分形特性 | 53 |
| 4.2 空间分形特性 | 60 |
| 4.2.1 定位事件空间演化规律 | 60 |
| 4.2.2 空间分形理论 | 63 |
| 4.2.3 空间分形特性 | 65 |
| 4.3 本章小结 | 70 |
| 第五章 论文总结与展望 | 72 |
| 5.1 论文总结 | 72 |
| 5.2 进一步工作展望 | 73 |
| 参考文献 | 74 |
| 致谢 | 80 |
| 攻读硕士学位期间发表的论文和参加的科研项目 | 81 |

Contents

| | |
|---|-----------|
| Chapter 1 Preface..... | 1 |
| 1.1The Problem and the Significance of Research..... | 1 |
| 1.2Research and Development of Acoustic Emission of Rock | 3 |
| 1.2.1The Character of Acoustic Emission Parameter Research | 3 |
| 1.2.2Fractal of Acoustic Emission Research | 6 |
| 1.3Research Method and Content | 8 |
| Chapter 2 Principle and Method of Acoustic Emission Testing | 10 |
| 2.1 Generate Condition of Acoustic Emission..... | 10 |
| 2.2 Propagation Characteristics of Acoustic Emission..... | 11 |
| 2.2.1 Elastic Waves in Solids..... | 11 |
| 2.2.2 Wave Attenuation in Elastic Medium..... | 12 |
| 2.2.3 Acoustic Emission Wave Propagation in Medium..... | 12 |
| 2.3 Analysis of Acoustic Emission Signal..... | 12 |
| 2.3.1 Type of Acoustic Emission Signal..... | 12 |
| 2.3.2 Characteristic Parameters of Signal Waveform..... | 13 |
| 2.4 Introduction of Location Algorithm..... | 17 |
| 2.5 Laboratory Test..... | 19 |
| 2.5.1 Preparation of Rock Sample..... | 19 |
| 2.5.2 Test Principles and Methods..... | 23 |
| 2.5.3 Test Instrument..... | 22 |
| 2.5.4 Operation of Acoustic Emission Instrument..... | 25 |
| 2.5.5 Loading Method | 29 |
| Chapter 3 Acoustic Emission Parameter Characteristics of Rock Specimen under Uniaxial Loading..... | 30 |
| 3.1 Acoustic Emission Characteristic under Simple Loading..... | 30 |
| 3.1.1 The Characteristic of Hit..... | 31 |

| | |
|---|-----------|
| 3.1.2 The Characteristic of Event..... | 34 |
| 3.1.3 The Characteristic of Energy..... | 36 |
| 3.1.4 Analysis and Discussion..... | 38 |
| 3.2 Acoustic Emission Characteristic under Incremental Loading and Unloading | 41 |
| 3.2.1 The Characteristic of Hit..... | 43 |
| 3.2.2 The Characteristic of Energy..... | 46 |
| 3.3 Kaiser Effect and Felicity Effect..... | 48 |
| 3.4 Chapter Summary..... | 50 |
| Chapter 4 Fractal Characteristic Research of Rock during Fracture..... | 52 |
| 4.1 Fractal Characteristic of Time Series of Hit and Energy..... | 52 |
| 4.1.1 Computation Method of Fractal Dimension | 52 |
| 4.1.2 Fractal Characteristic of Time Series of Hit and Energy..... | 55 |
| 4.2 Fractal Characteristics of Spatial Distribution..... | 63 |
| 4.2.1 Spatial Evolution Law of Locate Events..... | 63 |
| 4.2.2 The Theory of Spatial Fractal | 67 |
| 4.2.3 The Characteristics of Spatial Fractal..... | 69 |
| 4.3 Chapter Summary..... | 74 |
| Chapter 5 Conclusion and Issues for Further Study..... | 76 |
| 5.1 Conclusions of This Paper | 76 |
| 5.2 Important Issues for Further Study..... | 77 |
| References | 78 |
| Acknowledgements | 84 |
| List of Published Papers and Joined Research Projects..... | 95 |

第一章 绪论

1.1 问题的提出及研究意义

改革开放以来,我国的工业技术得到快速的发展,采掘技术进步显著,经济和科学技术的发展为我国隧道工程的建设提供了很好的保障基础,使隧道工程得到突飞猛进的发展。且随着西部大开发战略和五纵七横的国内主干线的持续推进,长、大、深隧道将是 21 世纪隧道工程发展的总体趋势。与过去埋深浅的隧道相比,埋深大的隧道穿越的地层较为复杂,容易受到构造应力和高地应力的影响^[1-3]。从已有的大量国内外资料可知,当隧道施工过程中,穿越高或者极高地应力地段时,不可避免地会发生硬岩岩爆。事实上近几十年来,国内外在铁路隧道、公路隧道和水工隧道建设过程中,岩爆或者冲击地压现象,在高地应力地区都有出现。

川藏公路二郎山隧道主洞长 4 176 m,最深 760 米,施工过程中发生近百次岩爆活动,连续发生岩爆的洞段共有 8 段,岩爆总长度长达 1059m^[4,5]。马金岭隧道左线全长 3 325 m,右线全长 3 380 m,垂直埋深 550~1 615 m,施工中累计岩爆达 400 余次,导致施工作业人员被砸伤,作业机械被砸坏,工程被迫停工等安全生产事故。在这些岩爆中,中等岩爆多为透镜状及片状,最大可达 2.68 米,强烈岩爆的岩石弹射块则各种形状都有,最大长达 3.62 米^[6]。锦屏二级水电站的水工隧洞埋深 1600~2050m,最大埋深可达 2525m,对已经贯通的辅助洞岩爆进行统计,发生岩爆段总长 2981m^[7,8]。秦岭隧道长 18km,其中埋深超过 500m 的隧洞有 9km 长,埋深最大处达到 1620m,开挖过程中,发生轻微岩爆 28 段(总长度 1124m),发生中等岩爆有 11 段(总长度 650m),发生强烈岩爆有 4 段(总长度 120m),且这些岩爆段的埋深都在 900m 以下^[9]。Simplon 水工隧洞位于阿尔卑斯山区,隧洞岩体埋深 2 200 m,施工过程中发生岩爆,岩爆随深度增加而更强烈,且有规律,日本在修建清水隧洞过程中,在隧洞的埋深介于 1 010m 至 1 310 m 的深度段有岩爆发生,弹射的岩片尺寸从几厘米到几米都有,厚度介于 10~30 cm 之间^[8]。

鉴于岩爆是深埋岩石隧道工程中一种常见的工程地质灾害,对施工设备和已完成的隧道结构造成巨大损坏,严重威胁着隧道建设人员安全,无形中给施工人员带来巨大心理压力,影响工程建设进程、增加建设投资。因此需要在深埋岩石隧道掘进施工过程中采用先进的监测预测技术对隧道围压岩爆进行监测预警,并

制定必要的防治措施，从而保证安全高效施工。

中铁二十四局集团福建铁路建设有限公司于 2010 年 4 月承建北武夷山隧道福建段 DK528+450~DK534+926 标段，全长 6476m，其中有约 1150m 长的施工段在 644.3~1100m，属于极高应力区，开挖过程中存在岩爆可能性。在这样的背景下，中铁二十四局福州铁路建设有限公司与厦门大学展开合作，探索隧道安全预警新方法、新技术，提高安全生产保障。

在岩石力学与工程领域，针对岩爆现象进行预测、预警的方法有包括有：1、电磁辐射法，电磁辐射法根据岩体在发生岩爆前，电磁辐射增强对岩爆进行预测；2、微重力法，岩石在临界岩爆状态时出现负重力异常现象，微重力法根据这一现象对岩爆作出预警；3、施工地质超前宏观观测法，施工地质超前宏观预测是依据超前钻孔过程中出现岩芯饼化等对是否发生岩爆进行预测；4、钻屑量法，对岩体钻孔，在钻孔过程中收集并统计单位孔深的排粉量，根据孔洞排粉的变化，结合钻孔过程中发生的动力现象，对岩爆进行预报；5、水分法和流变法等，水分发原理为根据钻孔取样的岩石试样的含水量来评价发生岩爆的可能性，流变法是通过测定岩体应力松弛速度并结合岩体破坏程度进行岩爆倾向性预测。以上这几种方法除流变法外，都不能实现实时监测，但流变法实施难度大，影响工程进度。

声发射与微震监测技术是一种无损检测技术，是研究材料破坏过程的良好工具，它是根据声波或地震原理，来探测岩爆发生前岩体破裂的前兆特性，进而对将来要发生的岩爆进行评估和预警。该方法最早始于上世纪二十年代的南非深井金矿开采，而后美国、加拿大和澳大利亚等国的金属矿山都采用该监测技术对矿山进行监测。在国内，凡口铅锌矿、冬瓜山铜矿、大红山铁矿和红透山铜矿等矿山也运用该方法开展了深部地压和岩爆监测预警研究。与上述几种方法相对比，声发射与微震监测技术是绿色无公害技术，且能够对材料内部破坏过程进行连续和实时监测。随着技术的发展，现已能够实现对其破坏位置进行定位，这是其他任何监测方法都不具有的优点。鉴于声发射与微震监测的这些优点，并综合比较了隧道施工中现有的岩爆监测预警方法，通过广泛深入的咨询、交流与讨论，最终决定在该深埋、大断面单洞双线铁路隧道首创性地进行声发射与微震监测岩爆监测预警研究。

为更好地开展北武夷山隧道隧洞开挖现场围岩体稳定性声发射与微震监测预警工作,提高隧洞岩爆安全预警准确性,本文对取自北武夷山隧道围岩中具有典型代表性的花岗岩和凝灰岩进行室内声发射试验,为现场微震监测预警工作提供预警指标。

1.2 室内岩石声发射研究进展

材料在力作用下,内部由于微破裂产生而导致弹性波释放的现象称为声发射。折断一根小木棍产生的声音、木柴在火中燃烧时产生的噼啪声,均是生活中比较常见的声发射例子。岩石声发射是指岩石在荷载作用下,岩石内部存在的原生缺陷和原生裂纹部位产生应力集中,在这些区域内应力集中发展不均匀,导致岩石内部的缺陷与原生裂纹破裂并释放出弹性波^[10]。从岩石的声发射现象发现至今,国内外学者们已经对岩石的声发射特性进行了大量研究。

1.2.1 声发射参数研究进展

1. 国外研究进展

Obert 在 20 世纪 30 年代就发现岩石具有声发射现象,而后在矿山矿体中运用该技术进行稳定性监测及岩爆预警^[11]。40 年代,Obert 和 Duvall 为了对矿山矿体开采诱发岩爆进行更好的预测,在室内开展了岩石声发射试验^[12]。

50 年代,德国金属物理学家 J. Kaiser^[13]将金属材料受力破坏过程与声发射现象结合起来研究,发现众多合金以及金属在受力破坏过程中都存在有声发射现象,且材料形变声发射过程中具有不可逆特性,这一不可逆现象在后来被科学家们称之为 Kaiser 效应。随后 Goodman 在对多种岩性岩石试样重复加载研究中发现,岩石类材料同样也具有 Kaiser 效应^[14]。自那时开始,声发射技术的研究在民用工程、金属加工、材料试验等许多行业得到广泛的开展^[15]。

20 世纪 50 年代末期,美国学者对声发射技术进行了较多的研究。Schofield^[16]于 1954 年开始进行声发射技术工程应用的研究,Schofield 和 Ttatro^[17]合作,细致探讨了声发射试验过程中的各种问题,并用它来研究材料声发射的物理机制。

60 年代初期,茂木清夫系统性地开展大量的岩石室内声发射试验,主要研究岩石在不同类型荷载、不同加载方式下破裂过程中的声发射特性^[18-21]。60 年代末,Scholz 在对花岗岩进行单轴加载试验中,首次对声发射源进行了定位^[22],随后 Mogi 在对各种岩性梁型试样加载破坏研究中,也对声发射源进行定位,并

获得可靠及较高精度的定位效果^[23]。Lockner、Nishizawa 和 Masuda 等学者运用更加先进的方法进行了声发射源定位试验,但定位效果都没有 Mogi 之前做的好^[12]。

80 年代,一些日本学者开展一系列室内试验对岩石 Kaiser 效应进行研究。其中有 Yoshikawa 在考虑水和温度影响条件下,采用新的加载循环方式,在 Kaiser 效应不明显的条件下对初始地应力进行初步判定^[24],而后又在重复加载条件下研究了 Kaiser 效应的时间依赖性,认为其依赖程度以前期应力水平有关^[25]。Holcomb 采用声发射技术研究在荷载作用下,岩石材料声发射特^[26,27]。

90 年代,Rao 等在单轴条件下对岩石试样进行循环加卸载,研究其在该荷载条件下岩石渐进破坏的声发射特性^[28]。Lockner 对岩石加载破坏过程中的声发射前兆特性,波形特性和声发射源发展过程进行研究,借此讨论岩石加载过程破坏机理^[29]。Cox 等有策略性地对岩石微破裂和软化过程的声发射特性进行研究^[30]。Rudajev 采用单轴压缩的试验方法,对岩石声发射特性进行研究^[31,32]。

20 世纪后期,Dai 对岩石内部破裂损伤发展声发射特性进行研究,通过分析认为,声发射均方根值可以用于实时监控和岩石破坏到来的预测^[33]。近年来,Manthei 通过多种矩张量分析方法,研究了岩石内部破裂声发射源与最终破坏平面间关系^[34]。Tsuyoshi 在水压致裂试验中,通过声发射技术研究不同颗粒尺寸下岩石的破坏形式^[35]。Tham 在试验中发现,岩石试样在拉伸破坏过程中,声发射源的分布经历了初始随机分布阶段、集结成核阶段、继续增殖至主破裂阶段。不同岩性岩石试样,峰值前的微破裂集聚程度存在差异,这主要是岩石类材料非均质性导致的^[36]。Ganne 等研究了岩石材料脆性破坏过程中,能量累积的 4 个阶段变化特性^[37]。

2. 国内研究进展

将声发射监测技术于 20 世纪 70 年度被引入中国,并运用于矿山生产中。学者陈颢较早地对声发射技术进行介绍,评述了他在岩石力学方向应用这一技术对地震序列和破裂机制进行研究的一些结果,并应用该技术进行岩石声发射特征室内试验研究^[38]。在三轴压缩条件下,通过改变应力路径进行研究,获得岩石的声发射和应力状态与应力途径均有关的结论^[39]。

龙湘桂通过自制的声发射系统,初步测试和探讨室内及室外的模型试验过程

中的声发射现象, 结果表明材料破裂过程中的声发射现象关系密切^[40]。陈忠辉在三维应力条件下进行岩石的快速加卸载, 并利用统计损伤理论研究围压变化对试样破裂声发射特性的影响, 结果表明围压快速卸载会导致声发射事件突增^[41]。

李庶林教授使用刚性压力机, 采用单轴压缩的加载方式, 通过简单加载和增量加卸载, 对岩石受力破坏全过程展开声发射特性研究。结果表明岩石声发射特性与应力状态相关, 在接近峰值荷载时有声发射平静期现象^[42]。Kaiser 效应受岩石特性影响, 并与加卸载应力水平有关, 当前次峰值荷载在破坏荷载 50% 以下时, 卸载再加载过程中几乎没有声发射现象, 而当超过 60% 时却出现 Felicity 效应^[43]。

蒋宁等通过循环荷载对岩石疲劳破坏声发射特征与变形之间关系进行研究, 结果表明整个加载过程中, 声发射可分为三个阶段, 分别为循环开始时声发射率较高和位移发展较快阶段、随后声发射率降低, 位移以等速率发展、破坏点声发射率急剧突增, 位移迅速发展三个阶段^[44]。袁子清采用单轴压缩研究具有岩爆倾向性岩石声发射特性, 发现弹性段前期, 岩石 AE 数和能量显著增加, 岩石声发射参数变化和能量曲线都呈近乎直线增长, 在试样破坏前, 声发射能量率和声发射事件率都发生显著增长, 在岩石试样破坏后, 这两个参数出现显著下降趋势^[45]。

赵兴东根据声发射及其定位技术, 对岩石试样破裂失稳过程进行研究。结果表明定位事件分布与荷载有关, 在荷载较低时, 事件分布较为分散, 而后随荷载的增加, 事件逐渐沿着破裂面的位置聚集。加载破坏过程中, 定位事件空间分布产生空白区, 空白区在后期贯通破坏, 可以根据空白区分布位置, 对岩石试样的破坏模式进行分析^[46]。

谢强在多次循环加载研究中表明, 细晶花岗岩具有明显的 Kaiser 效应, 且随着所受应力提高, Kaiser 效应减弱。根据能量曲线拐点确定 Kaiser 效应点, 更为容易且合理^[47]。许江等在对岩石周期荷载下声发射特性研究中表明, 上限应力对声发射特性影响较大, 加载速率的增加提高了声发射率^[48], 其在定位发展研究中指出, 颗粒较细、结构较均匀的岩石试样, 声发射事件空间分布弥散, 两端无明显的条带丛集现象, 这种颗粒特性的岩石试样破坏无明显特性^[49]。

冯夏庭等在单轴荷载条件下研究砂卡岩声发射特性研究, 发现砂卡岩加载过程中声发射具有压密阶段稳定增加, 弹性段保持平稳, 塑性段再次稳定增加, 破

坏段剧增的特性,且随着循环的进行,Felicity 比不断降低,表明岩石试样内部损伤程度不断提高^[50]。黄玉仁在单轴加载条件下,对花岗岩和凝灰岩两种岩性岩石试样进行室内声发射研究,探讨了将声发射事件率、撞击率和能量率变化特性结合起来,应用到隧道掘进过程中进行围岩体稳定性监测预警的可行性^[51]。张茹在研究中发现,稳压时声发射事件率、能量率低,事件数稳定,从侧面反映稳压阶段试样内部裂纹未发展、新生裂纹少。并对试验过程中,在临近破坏前出现的平静期现象,从物理过程上对其进行探讨^[52]。

1.2.2 声发射分形研究进展

1. 国外研究进展

分型理论由法国数学 Mandelbrot 创立^[53]。在岩石力学领域如矿物学、岩石断裂、地质构造、岩石破碎、地下水渗透、岩石和土粒子的表面和孔隙、节理粗糙度等均有研究成果^[54]。

80 年代,PaPe, H. 等人在花岗岩岩芯水力致裂和破裂探测试验中,运用分形维对花岗岩内部微破裂的形成和发展过程的显微及次显微行为自相似性进行描述^[55]。Mildner D. F.R. 等人对页岩的微观界面进行分形特性分析,认为两者存在负相关关系^[56]。Thompson 等以小于晶粒粒径尺寸对孔隙几何情况进行量化,并且将该量化特性应用到渗流理论的研究上^[57]。Seto 等人采集了某煤矿的声发射信息并用于岩体破坏机制的研究,计算得到分维数为 2.08^[58]。90 年代, Lee 等人采用分形维数量化方式分析不连续面粗糙程度,结果表明不连续面粗糙程度与分形维数相关,不连续面越粗糙,分形维数越高,峰值剪切强度也越高^[59]。

在声发射分形分析方面, Sato 等人开展了一系列研究,并通过模型对破坏进行模拟与试验结果进行对比分析,模拟的结果为两者的 b 值变化和分维值变化保持一致。在三种不同岩性试样拉伸试验中,研究其破坏过程中自相似性质,并将能量与裂缝空间分布的多重分形联系了起来,并用试验证实了数位模拟的结果^[60]。Alkan 等人将声发射技术和三轴压缩试验结合起来,研究岩盐扩容边界问题,分析认为分形维数值较小的岩石试样对应着稍微高一点的扩容界限^[61]。Maystre D 通过试验表明,岩石加载破坏过程中的声发射不仅时间上具有分形特性,在空间上也同样具有分形特性^[62]。Biancolinia 等运用盒维法求解裂缝形成及扩展的源空间分布分形维数,结果表明分维值可以很好地表征试件内部破裂情况^[63]。

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库